

Retificadores

Prof. Dr. Rogério Furlan

1.1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, hoje disponível em grande quantidade graças às extensas redes de distribuição, apresenta-se sob a forma de Corrente Alternada Senoidal, em geral de 220V ou 110V (valores eficazes)* e frequência de 50 ou 60 Hz. Esta pode ser utilizada diretamente para acionamento de motores, aquecimento resistivo e iluminação. Outras aplicações requerem corrente contínua como, por exemplo, os processos eletrolíticos industriais, o acionamento de motores de alto conjugado de partida (utilizados em tração elétrica e controles industriais), carregadores de bateria e a alimentação de praticamente todos os circuitos eletrônicos.

A obtenção de corrente contínua, a partir da corrente alternada disponível, é indispensável nos equipamentos eletrônicos. Estes, invariavelmente, possuem um ou mais circuitos chamados **Fontes de Alimentação** ou **Fontes de Tensão**, destinados a fornecer as polarizações necessárias ao funcionamento dos dispositivos eletrônicos. Aos circuitos ou sistemas destinados a transformar corrente alternada em contínua damos o nome genérico de **Conversores C.A. - C.C.** (ou em inglês, *A.C. - D.C., alternate current - direct current*).

Para obtenção de corrente contínua em escala industrial (acima de dezenas de quilowatts), utilizam-se conversores constituídos de **grupos motor-gerador** em que o motor de corrente alternada é acionado pela rede e move um gerador de corrente contínua, como mostrado na figura 1.

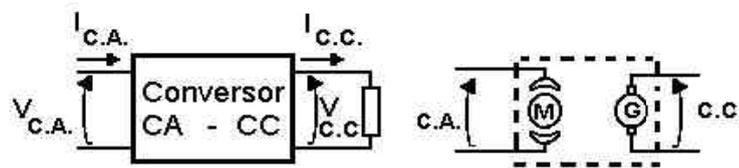


Figura 1: Conversores C.A. - C.C.

Para obtenção de corrente contínua em pequena escala, como na alimentação de equipamentos eletrônicos a conversão se faz por meio dos circuitos retificadores, que em muitos casos começam a substituir os conversores eletromecânicos (motor-gerador) até para elevadas potências, devido ao alto rendimento que apresentam.

* Lembre-se que para uma forma de onda senoidal, o valor eficaz (ou rms - *root mean square*) de 110V corresponde a um valor de pico de $110 \times \sqrt{2} \cong 155V$, ou 310V de pico-a-pico.

1.2 CIRCUITOS RETIFICADORES COM DIODOS

Analisaremos a seguir vários tipos de circuitos onde a retificação é realizada por diodos semicondutores. Como você já sabe, o diodo semicondutor é um componente não linear que permite passagem de corrente num sentido e impede a passagem de corrente no sentido contrário. Na figura 2 temos o símbolo de um diodo semicondutor bem como as curvas características de um diodo ideal e de um diodo real.

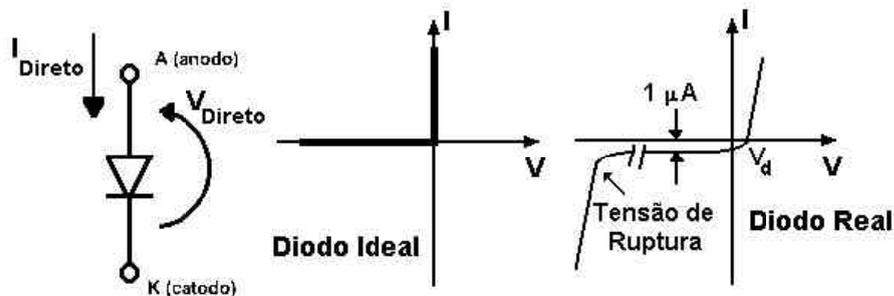


Figura 2: Diodo semicondutor.

Como vemos, dentro de certas limitações, as duas curvas são bem semelhantes. Evidentemente, o fator de escala para correntes no sentido negativo está exagerado, e a queda de tensão no sentido direto (da ordem de 1 V) pode ser desprezada em primeira análise na maioria dos circuitos (como veremos mais adiante a queda de tensão v_d no sentido direto no diodo é geralmente muito menor que tensão do transformador e a queda de tensão nos demais componentes). Já a ruptura da junção do diodo ocorre em tensões reversas elevadas nas quais o diodo não deve ser utilizado para retificar. Por exemplo, para 200 V eficazes (pico de 280 V) devemos utilizar um diodo que tenha tensão de ruptura pelo menos de 300 V (o melhor seria cerca de 500 V para maior margem de segurança) e com isto garantirmos que não ocorrerá ruptura.

Além da tensão de ruptura, os diodos reais possuem outras limitações (geralmente indicadas pelo fabricante nos manuais), que passaremos a enumerar:

- Tensão de Ruptura:** Já explicada acima, aparece nos manuais como $V_{reverso}$.
- I_d máx:** Corrente direta contínua máxima.
- I_{pico} repetitivo:** Máximo valor de pico repetitivo (função da frequência).
- I_{surto} :** Máximo valor de corrente de pico não repetitivo, é função da frequência e dos parâmetros do circuito e da duração do surto inicial.
- v_d :** Tensão direta aplicada no diodo durante a condução.
- I_{rev} máx:** Máximo valor da corrente Reversa.

Geralmente, o fabricante fornece mais dados como: capacitância parasitária do diodo, características mecânicas e térmicas do componente. No estudo dos circuitos apresentados a seguir vamos considerar um diodo modelado por um diodo ideal em série com uma fonte de tensão v_d .

1.2.1 Retificador de Meia Onda, Carga Resistiva

No circuito mostrado na figura 3, a corrente na resistência de carga R_C só circula num sentido, embora a tensão $e_G(t)$ aplicada ao circuito seja alternada (senoidal). A corrente só circula quando o potencial do ponto A (P_A) for mais elevado que o potencial do ponto B (P_B) acrescido de v_d , ou seja $e_G(t) > v_d$, quando o diodo se acha em plena condução. Nesta situação, a tensão $(e_G(t) - v_d)$ fica toda aplicada na resistência de carga e a corrente é dada por $(e_G(t) - v_d)/R_C$.

Quando $e_G(t) < v_d$, o diodo bloqueia completamente e não há fluxo de corrente. Como não há queda de potencial através da resistência de carga, toda a tensão fica aplicada no diodo.

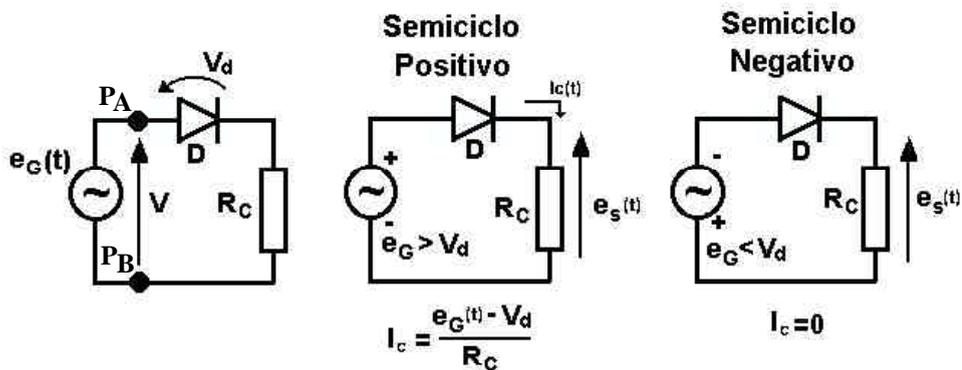


Figura 3: Circuito retificador de 1/2 onda com carga resistiva.

A figura 4 mostra as formas de onda que aparecem no circuito. Nota-se que a corrente só passa em um sentido e possui um valor médio (componente contínua) não nulo e que a tensão reversa máxima no diodo é $|-E_G|$.

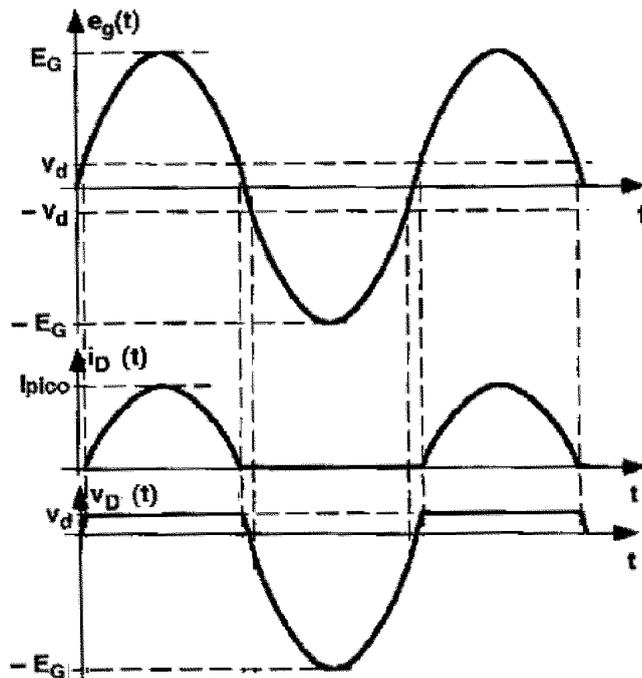


Figura 4: Formas de onda no retificador de 1/2 onda sem filtro

1.2.2 Retificador de Onda Completa, Carga Resistiva

1.2.2.1 Retificador em Ponte

O circuito da figura 5 permite condução em R_C nos dois semiciclos da senóide, o que significa que para uma mesma tensão de entrada $e_G(t)$ a corrente média é o dobro da que tínhamos no circuito anterior.

Quando $e_G(t) > 2v_d$ (pois agora temos dois diodos em série), os diodos D_1 e D_3 conduzem (figura 6.a), o que automaticamente bloqueia D_2 e D_4 . Ou seja, D_1 cria um caminho de corrente entre o terminal superior de R_C e o potencial P_a e D_3 cria um caminho de corrente entre R_C e o potencial P_b . Portanto, na resistência R_C temos uma tensão $e_s(t) = (e_G(t) - 2v_d)$ e a corrente será dada por $(e_G(t) - 2v_d)/R_C$.

Quando $-2v_d < e_G(t) < 2v_d$, nenhum diodo conduz e portanto $i_c(t) = 0$.

Quando $e_G(t) < -2v_d$ (figura 6.b), isto é, quando $P_a < (P_b - 2v_d)$, o diodo D_2 conduz bloqueando D_1 e o diodo D_4 conduz também, bloqueando D_3 . A corrente passa pelo caminho formado por D_2 , R_C e D_4 , passando pela resistência **no mesmo sentido** que o anterior. Agora vale a relação $e_s(t) = (-e_G(t) - 2v_d)$.

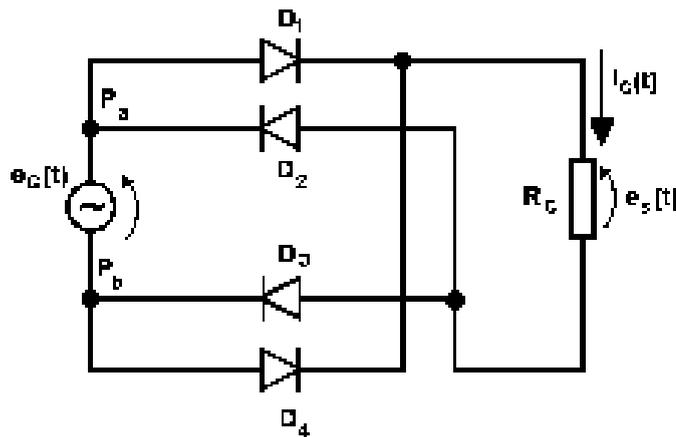


Figura 5: Circuito retificador de onda completa com ponte de diodos.

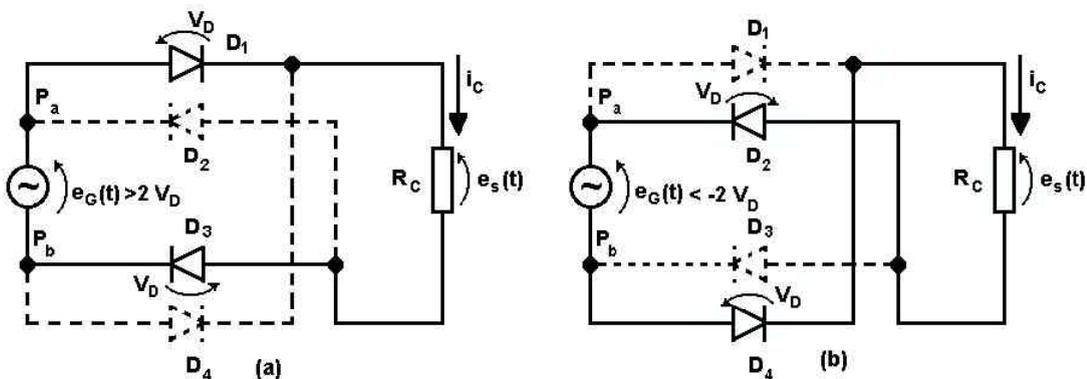


Figura 6: Sentidos de condução no retificador de onda completa em ponte:
a) $e_G(t) > 2v_d$; b) $e_G(t) < -2v_d$.

Na figura 7 vemos as formas de onda do circuito retificador em ponte. Nota-se que a corrente do gerador é ainda senoidal, embora a corrente em R_C passe sempre num só sentido.

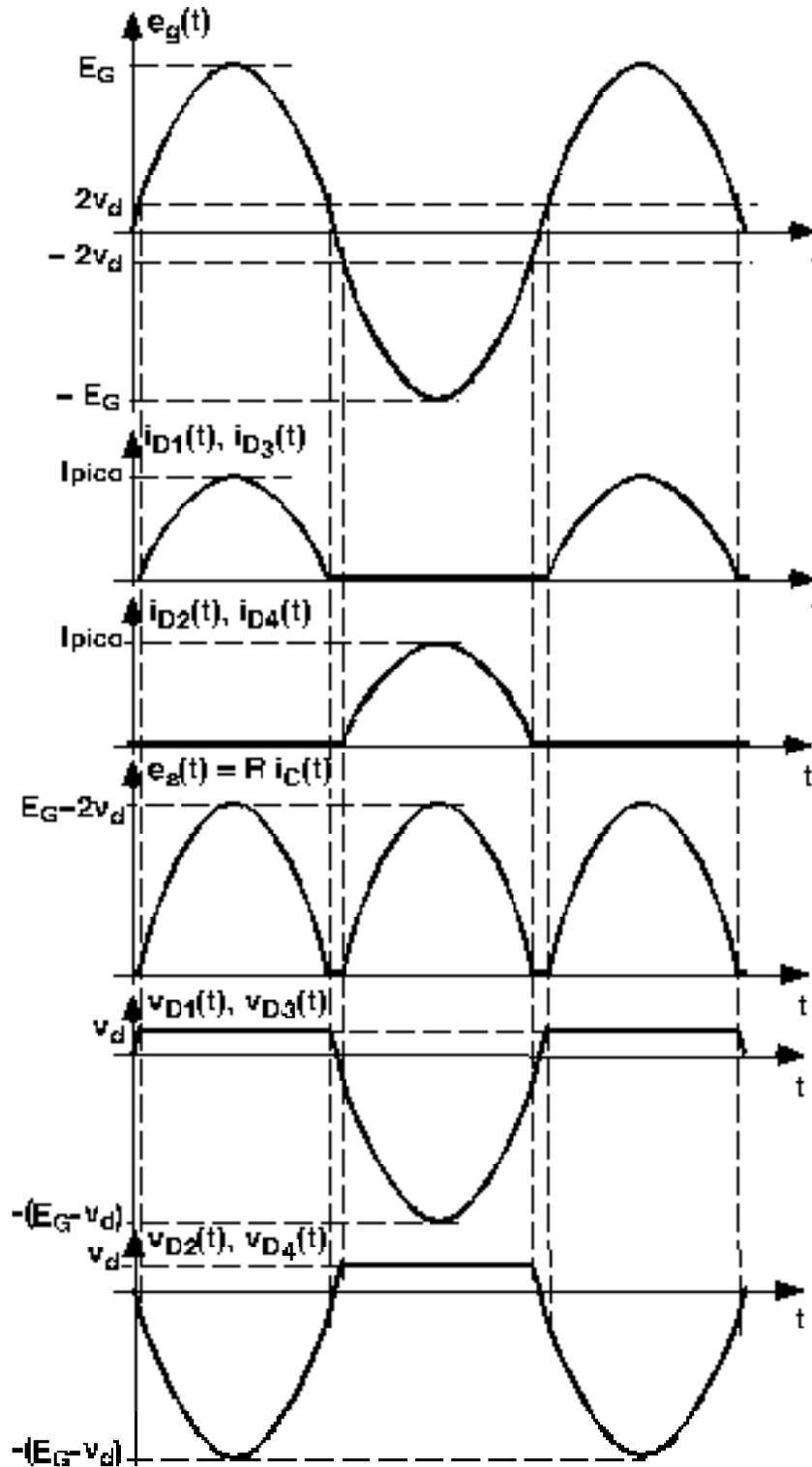


Figura 7: Formas de onda no retificador de onda completa em ponte.

Como normalmente $E_G \gg v_d$, a tensão reversa máxima em cada diodo é aproximadamente $|-E_G|$.

1.2.2.2 Retificador de Onda Completa com Transformador de Terminal Central

O circuito da figura 8, que utiliza um transformador com terminal central (*center tap*), também permite a passagem de corrente por R_c nos dois semiciclos da senóide.

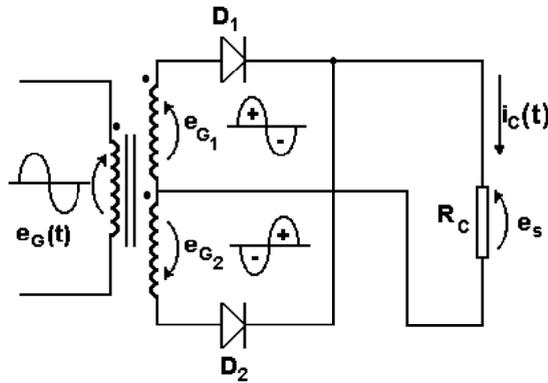


Figura 8: Retificador de onda completa com transformador de terminal central.

O funcionamento do circuito, de acordo com os semiciclos de $e_{G1}(t)$ e $e_{G2}(t)$, está ilustrado na figura 9.

No primeiro semiciclo (figura 9.a), $e_{G1}(t)$ é positivo e $e_{G2}(t)$ é negativo, e portanto o diodo D_1 conduz e o diodo D_2 corta assim que $e_{G1}(t) > v_d$.

No segundo semiciclo (figura 9.b), $e_{G1}(t)$ é negativo e $e_{G2}(t)$ é positivo, e portanto o diodo D_1 corta e o diodo D_2 conduz assim que $e_{G2}(t) > v_d$.

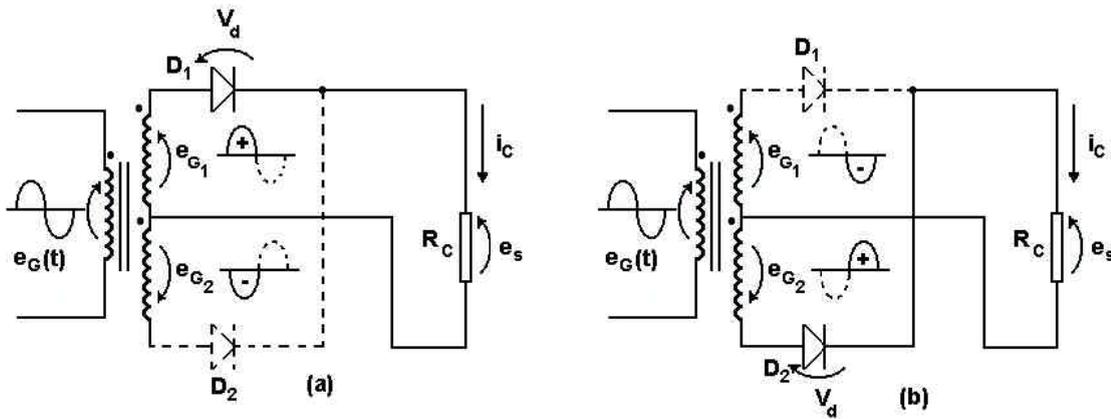


Figura 9: Funcionamento do circuito retificador de onda completa com transformador de terminal central.

Nota-se que a corrente sempre circula em um mesmo sentido sobre a carga. A tensão reversa máxima sobre cada diodo é o dobro da tensão de pico que aparece em cada metade do secundário, $|2E_G|$, se desprezarmos v_d .

1.2.3 Retificador de Pico (carga capacitiva)

No circuito da figura 10 temos o retificador de pico, onde ao invés de uma carga resistiva (item 1.2.1), temos uma carga puramente capacitiva (idealmente).

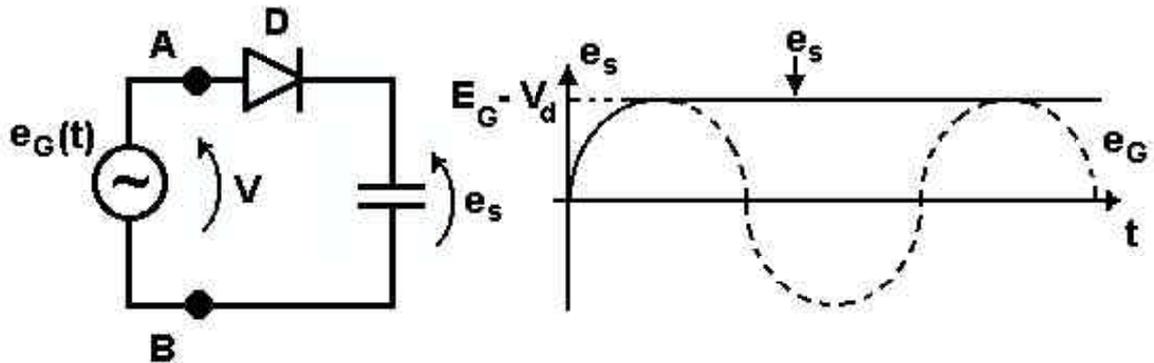


Figura 10: Retificador de pico.

O capacitor só pode se carregar positivamente, pois o diodo não permite a circulação de corrente no semiciclo negativo.

Durante o primeiro semiciclo positivo de $e_G(t)$ o diodo conduz totalmente e carrega o capacitor com a tensão $(E_G - v_d)$.

Quando $e_G(t)$ começa a cair, o capacitor tenderia a se descarregar, o que bloqueia D imediatamente, impedindo que o capacitor se descarregue.

Portanto, o capacitor mantém a carga correspondente a $(e_G(t) - v_d)$, e a tensão $e_s(t)$ entre suas extremidades terá o valor $(E_G - v_d)$.

No caso da figura citada, vamos supor que ao ser aplicada a tensão $e_G(t)$ ao circuito, o capacitor já possuísse uma carga inicial Q_0 , o que manteria a tensão nos seus terminais no valor $V_0 = Q_0/C$. Então, o diodo só começaria a conduzir quando $e_G(t)$ atingisse a tensão $(V_0 + v_d)$. Isto é verdade mesmo que a tensão de entrada tenha uma outra forma da onda.

1.2.4 Retificador de Meia Onda com Filtro Capacitivo

O circuito mostrado na figura 11 apresenta o que chamamos de “filtragem” que, no caso, consiste na eliminação de variações bruscas na tensão $e_s(t)$ sobre a carga resistiva R_c graças à presença do capacitor C que age como “amortecedor”.

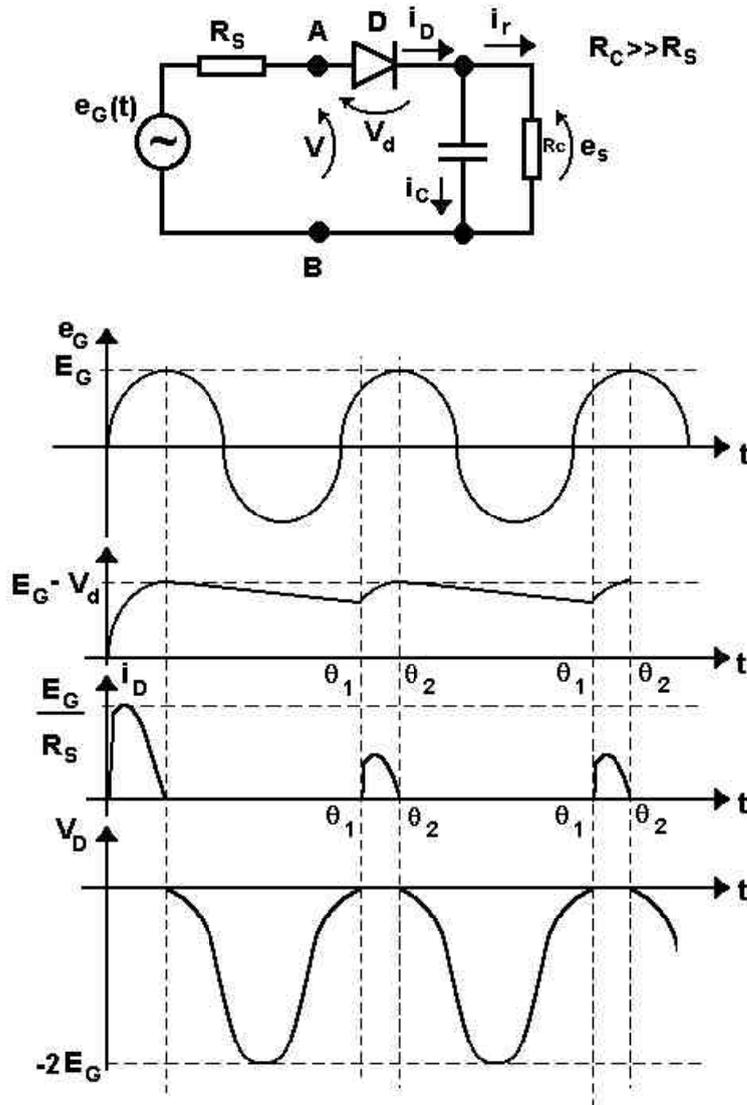


Figura 11: Retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Suponhamos que o capacitor esteja inicialmente descarregado. Ao chegar o primeiro semiciclo positivo de $e_G(t)$, o diodo D conduz colocando C e R diretamente em contato com a tensão $e_G(t)$, a menos de v_d . Enquanto $e_G(t)$ estiver aumentando, o diodo estará conduzindo, a corrente na resistência será $(e_G(t) - v_d) / R$ e o capacitor vai se carregando até atingir a tensão máxima $(E_G - v_d)$.

Quando $e_G(t)$ atinge o máximo e começa a cair, a carga em C tenta voltar, o que é impedido pelo imediato bloqueio do diodo. A carga do capacitor não tem alternativa senão escapar suave e exponencialmente através de R (figura 12), enquanto a tensão no outro lado do diodo vai caindo até atingir o pico negativo de $e_G(t)$. Nesse instante, a tensão inversa sobre o diodo é máxima, sendo igual a aproximadamente $|-2E_G|$.

O diodo só volta a conduzir quando $e_G(t)$ iguala $e_S(t)$ (ângulo θ_1) e o capacitor então se carrega novamente ao máximo, até que ocorra novo bloqueio (ângulo θ_2).

Conforme observamos na figura 11, a corrente no diodo inicialmente atinge um valor bastante elevado (surto inicial), uma vez que ao o ligarmos o circuito, o capacitor encontra-se descarregado e na saída do circuito produz-se em conseqüência, um curto-circuito se desprezarmos a resistência série equivalente do capacitor (ESR). A corrente fica limitada apenas pela resistência da fonte de alimentação, R_S . Por isso, a citada resistência deve assumir um valor de compromisso entre um mínimo, que mantém este pico de corrente abaixo do nível máximo permitido, e um máximo que ainda satisfaça às exigências de regulação e rendimento do circuito.

Para o pior caso, teremos:

$$I_{\text{surto}} = \frac{E_G}{R_S + \text{ESR}} \cong \frac{E_G}{R_S} \quad (1)$$

A corrente no diodo em regime permanente, chamada de corrente de pico repetitivo, é dada por:

$$i_D(t) = i_C(t) + i_R(t) \quad (2)$$

Esta expressão é válida no intervalo $[\theta_1, \theta_2]$, denominado ângulo de condução, $\theta_2 - \theta_1$. No intervalo $[\theta_1, \theta_2]$, a corrente no capacitor é dada por :

$$i_C(t) = C \frac{d[e_g(t) - v_d]}{dt} \text{ onde } e_g(t) = E_G \text{ sen } \omega t \quad (3)$$

A corrente na carga será:

$$i_R(t) = \frac{(e_g(t) - v_d)}{R} \quad (4)$$

Portanto, temos:

$$i_D(t) = \frac{E_G}{R} (\omega RC \cos \omega t + \text{sen } \omega t) - \frac{v_d}{R} \quad (\text{para } \theta_2 \leq \omega t \leq \theta_1) \quad (5)$$

A expressão acima mostra que o valor da corrente através do diodo aumenta com a diminuição do ângulo de condução, podendo assumir níveis elevados. A corrente média que flui durante todo o ciclo é obtida do gerador durante o intervalo θ_1 até θ_2 . Devido a este motivo recomenda-se não utilizar a capacidade máxima de corrente dos diodos, quando forem trabalhar com carga capacitiva.

Quanto menor for a descarga do capacitor durante o bloqueio do diodo, menor será a queda de tensão nos seus terminais e tanto mais demoradamente ocorrerá θ_1 , o ângulo de início de condução. O ângulo de condução será, portanto, menor. O tempo com que C se descarrega através de R depende tanto de R como de C. Quanto maior for R menor será a corrente e mais lenta será a descarga. Por outro lado, quanto maior for C, para um mesmo R, mais carga terá que ser eliminada para obter um determinado decréscimo de tensão, o que levará mais tempo. O tempo de descarga de um circuito constituído por uma resistência e uma capacitância pode ser expresso pela constante de tempo do circuito, que nada mais é senão o

produto RC. Este valor é mostrado na figura 12 sobre a curva de descarga de um circuito R-C.

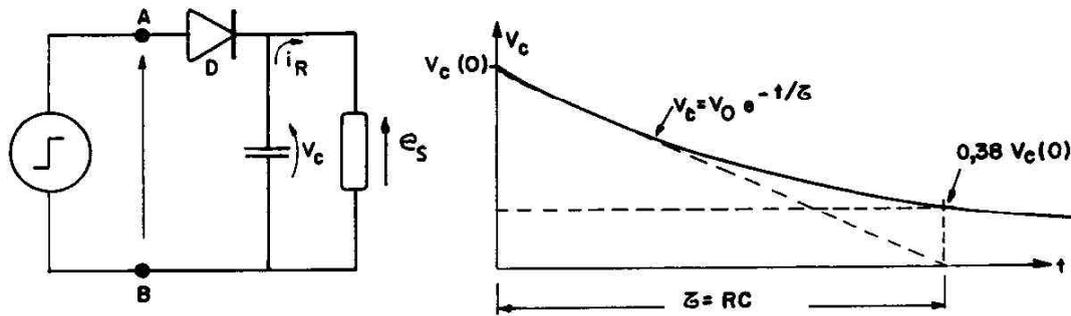


Figura 12: Transitório da descarga de um capacitor através de uma resistência.

A tensão média na carga pode ser calculada considerando-se a aproximação da figura 13, isto é, supondo que o capacitor se carrega instantaneamente e que a descarga é linear.

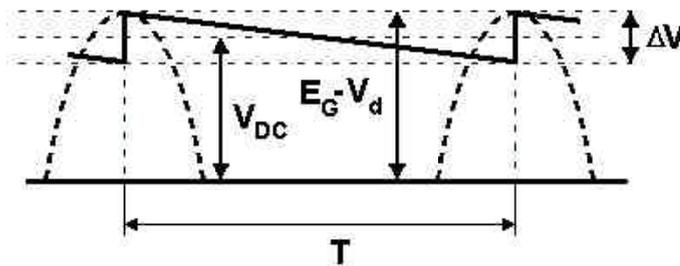


Figura 13: Aproximação usada no cálculo da tensão média de saída do circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Neste caso, a corrente média no capacitor é dada por:

$$I_{DC} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{onde} \quad \Delta Q = C \Delta V \quad (6)$$

Então:

$$I_{DC} = C \frac{\Delta V}{T} = C \cdot \Delta V \cdot f \quad (7)$$

e

$$V_{DC} = R \cdot C \cdot \Delta V \cdot f \quad (8)$$

Da figura 13 observamos que:

$$V_{DC} = (E_G - v_d) - \frac{\Delta V}{2} \quad (9)$$

Das equações de V_{DC} acima, obtemos:

$$V_{DC} = \frac{2 \cdot R \cdot C \cdot f \cdot (E_G - v_d)}{1 + 2 \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (10)$$

1.2.5 Retificador de Onda Completa em Ponte com Filtro Capacitivo

O valor médio da tensão de saída, calculado de forma análoga ao caso de retificador de meia onda com filtro capacitivo, é:

$$V_{DC} = \frac{4 \cdot R \cdot C \cdot f (E_G - 2v_d)}{1 + 4 \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (11)$$

e
$$\Delta V = [(E_G - 2v_d) - V_{DC}] \times 2 \quad (12)$$

Note que $e_G(t)$ é a tensão de saída em aberto do secundário do transformador (V_{Psec}).

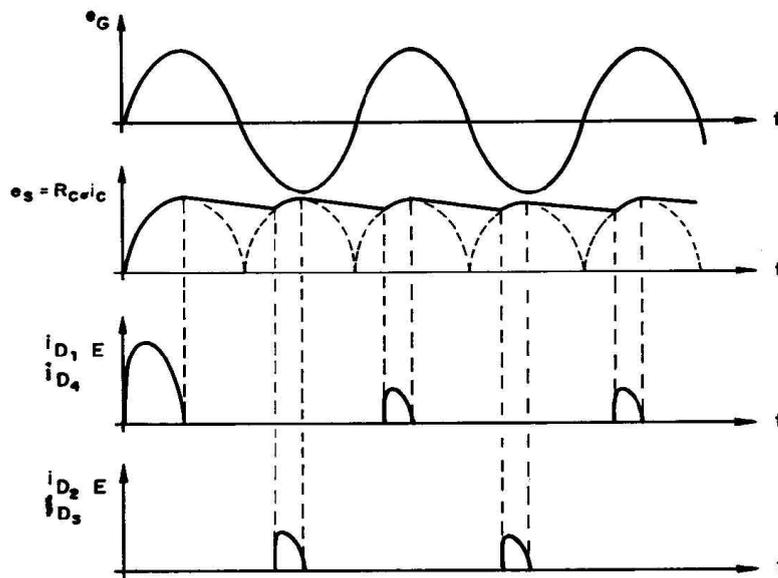
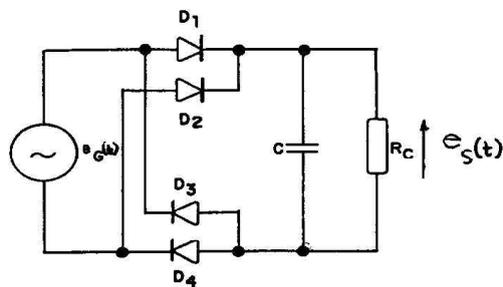


Figura 14: Retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo.

1.2.6 Retificador de Onda Completa com Filtro de Indutor à Entrada

Este circuito, mostrado na figura 15, por apresentar ΔV pequeno face a V_{DC} (diz-se que o circuito tem “boa regulação”), é utilizado com frequência em aplicações onde a impedância de carga sofre grandes variações. Em relação ao circuito anterior a filtragem é mais eficiente graças à presença da indutância L em série com o circuito RC de saída. A indutância apresenta “inércia” às variações bruscas de corrente, mesmo que entre seus terminais apareçam tensões variáveis de grande amplitude. Analisaremos a seguir em maior detalhe o funcionamento deste circuito.

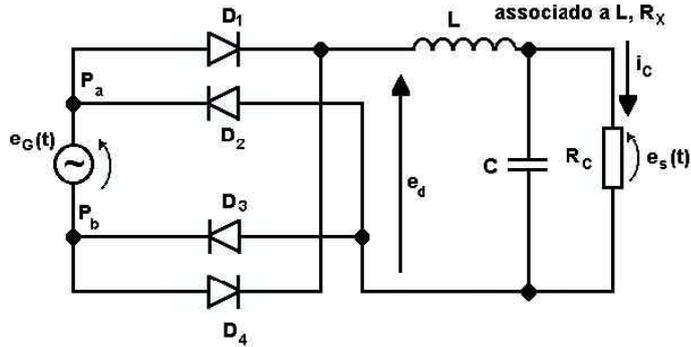


Figura 15: Retificador de onda completa com filtro indutivo.

Suponhamos inicialmente que a resistência de carga R_C esteja ausente. Como devido à disposição dos diodos, a corrente $i_L(t)$ só pode passar no sentido indicado na figura 15, o capacitor se carrega continuamente até atingir o regime estacionário, onde a tensão fica igual ao valor de pico ($E_G - 2v_d$). Uma vez alcançado esse valor a corrente deixará de fluir. Compreende-se, por extrapolação, que se ligarmos ao circuito resistências de carga muito elevadas a tensão de saída será aproximadamente igual a ($E_G - 2v_d$).

Se agora reduzirmos a resistência de carga, a corrente fluindo pela indutância não será mais nula no regime estacionário, e chegaremos logo a uma condição tal que, devido à inércia apresentada pela indutância, essa corrente na verdade nunca se anula, de maneira que sempre haverá diodos conduzindo. Quando $e_G(t) > 2v_d$ isto é, quando $P_a > P_b + 2v_d$, os diodos em condução são D_1 e D_3 e quando $e_G(t) < -2v_d$, ou seja, quando $P_a < P_b - 2v_d$, os diodos em condução são D_2 e D_4 . Portanto, a tensão e_d à entrada do filtro tem o aspecto que se vê na figura 16, e para a parte do circuito constituída de L , R_x (resistência série do indutor L), C e R_C tudo se passa como se na entrada tivéssemos aplicado um gerador de tensão e_d , como mostrado na figura 16.

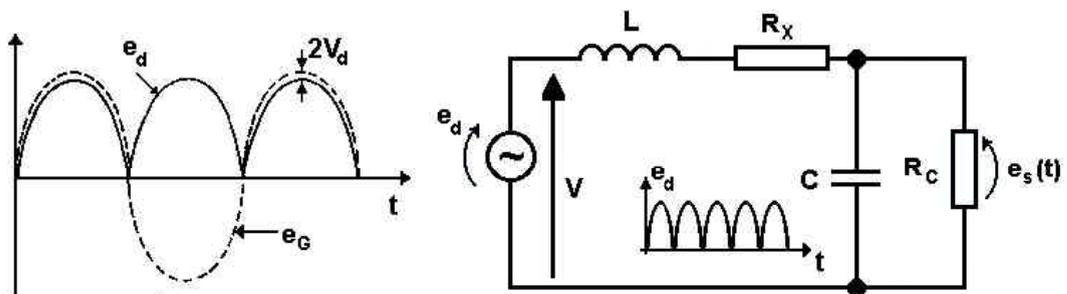


Figura16: a) Formas de onda de $e_G(t)$ e de $e_d(t)$; b) Circuito com filtro LC.

O circuito da figura 16b é linear e pode ser facilmente resolvido decompondo-se a tensão $e_d(t)$ em série de Fourier e utilizando-se métodos de análise da teoria de redes elétricas (vide referência 1 ou 2 da bibliografia). A tensão $e_d(t)$, pode ser escrita, portanto, como:

$$e_d(t) = \frac{2(E_G - 2v_d)}{\pi} + \frac{4(E_G - 2v_d)}{3\pi} \cos(2\omega t) + \dots \quad (13)$$

Forneceremos a seguir apenas os resultados desta análise:

1) Tensão contínua à saída da fonte:

$$V_{DC} = \frac{2}{\pi} \frac{R_c}{R_x + R_c} (E_G - 2v_d) \approx \frac{2}{\pi} (E_G - 2v_d) \quad (14)$$

Podemos notar que se a resistência própria do indutor, R_x , for desprezível em relação à resistência de carga, a componente contínua à saída é aproximadamente $0,64(E_G - 2v_d)$.

2) Amplitude de pico da componente alternada na saída:

Para $2\omega L \gg R_x$ e $1/2\omega C \ll R_c$, teremos:

$$E_{ca} = \frac{4(E_G - 2v_d)}{3\pi} \frac{1}{(4\omega^2 LC - 1)} \quad (15)$$

Esta componente tem o dobro da frequência da rede e é aproximadamente senoidal.

3) Valor da carga mínima (resistência máxima) necessária:

Vimos que se a resistência de carga for muito elevada, a tensão na saída do circuito se aproxima do valor $(E_G - 2v_d)$, devido às interrupções de corrente na indutância. Para se garantir a continuidade de corrente pela indutância, que por sua vez garante a validade das expressões 14 e 15, é necessário colocar à saída uma carga **Bleeder** (resistência fixa ligada na saída, R_B). O valor desta resistência é obtido fazendo-se com que o módulo do valor máximo negativo da corrente devida à componente alternada na saída seja menor que a corrente devida a componente contínua, não permitindo portanto que a corrente no indutor se anule. Desta forma, considerando $2\omega L \gg 1/(2\omega C)$ e $R_B \gg R_x$, teremos:

$$\frac{4}{3} \frac{(E_G - 2v_d)}{\pi} \frac{1}{2\omega L} < \frac{2}{\pi} (E_G - 2v_d) \frac{1}{R_B} \quad (16)$$

Portanto, $R_B < 3 \omega L$. Somente para resistências de carga menores que esse valor são válidas as expressões acima.

1.3 ALGUMAS DEFINIÇÕES RELATIVAS A FONTES DE TENSÃO

Em geral, é desejável que uma fonte de tensão forneça uma tensão contínua rigorosamente constante. Isto, porém, é impossível de se obter na prática. A tensão fornecida pode variar com a corrente solicitada pela carga e com as flutuações da rede, conforme mostrado pela figura 17. Além disso, a tensão sempre contém componentes alternadas provenientes de filtragem, como indicado pela figura 18.

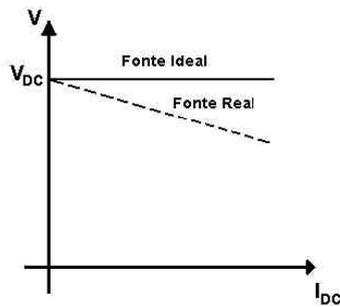


Figura 17: Variação da tensão de saída com a corrente solicitada pela carga (curva de regulação)

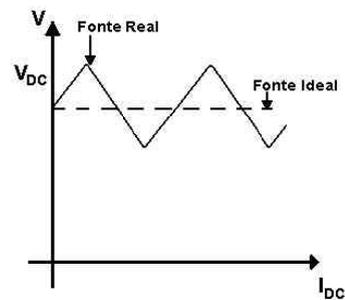


Figura 18: Ilustração da presença de componentes alternadas na tensão de saída.

A queda de tensão devido à corrente de carga é expressa pela curva V_{DC} (componente contínua da tensão de saída) versus I_{DC} (componente contínua da corrente de carga), chamada **curva de regulação**, de onde obtemos a **regulação** (para uma dada carga):

$$\text{Regulação de Carga} = \frac{\text{Tensão em Vazio} - \text{Tensão com Carga}}{\text{Tensão em Vazio}} \quad \left| \begin{array}{l} (17) \\ \text{mantendo-se a tensão de} \\ \text{entrada constante} \end{array} \right.$$

Em geral, a regulação é definida para a condição de plena carga, isto é, para a máxima corrente permitida. Esta definição pode ser usada também para geradores senoidais desde que se tomem valores eficazes de tensão.

O conteúdo de componentes alternadas na tensão de saída é expresso pelo **fator de ondulação**:

$$f.o. = \frac{\text{Valor Eficaz da Componente Alternada da Tensão de Saída}}{\text{Tensão em Contínua de Saída}} \times 100\% \quad (18)$$

Uma boa fonte de alimentação deve ter baixa regulação e baixo fator de ondulação.

Note que para:

- ondas senoidais, $V_{pico} = \sqrt{2} V_{eficaz}$,
- ondas triangulares, $V_{pico} = \sqrt{3} V_{eficaz}$.

1.4 CURVAS DE SCHADE

Para circuitos retificadores monofásicos de alta potência, onde os componentes são bastante onerosos e cujos projetos devem ser bem dimensionados, podemos calcular o valor de tensão média de saída (V_{DC}), corrente de pico repetitivo (I_P), corrente eficaz nos diodos (I_{ef}) e valor eficaz das componentes alternadas da tensão de saída (V_{ef}), utilizando as curvas de Schade (V. referência 5 da bibliografia), mostradas no apêndice.

Vejamus um exemplo, para o caso de um retificador de onda completa em ponte:

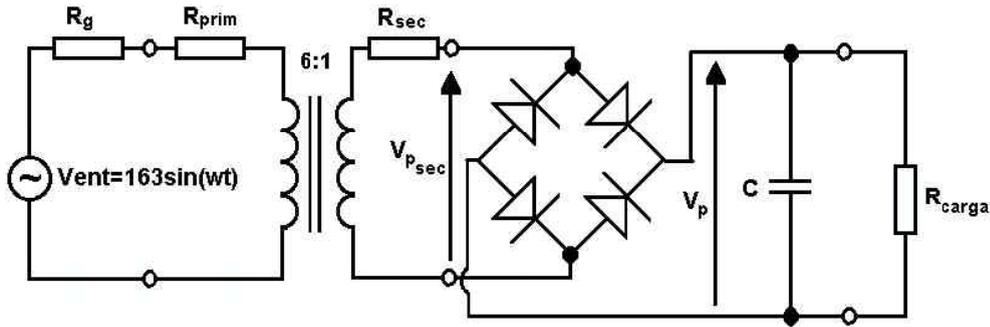


Figura 19: Retificador em ponte considerando-se as perdas no transformador.

Seja: $V_{ent} = 115V_{ef}$, $(V_{PICOent} = 163V)$, $R_g = 0\Omega$,
 $R_{fio} = 0,8\Omega$, $R_{carga} = 250\Omega$, $C = 200\mu F$
 $R_{prim} = 50\Omega$, $R_{sec} = 2\Omega$, relação de transformação 6:1,

Sabe-se ainda que:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 60\text{Hz} = 377 \text{ s}^{-1} \text{ (frequência da rede elétrica no Brasil: 60Hz)}$$

$$R_{ST} = \text{Resistência total equivalente do secundário} =$$

$$= (R_g + R_{prim})_{\text{refletidas no secundário}} + R_{sec} + \text{todas resistências de fiação, etc.}$$

$$(R_g + R_{prim})_{\text{refletidas no secundário}} = \left(\frac{\text{Tensão no Secundário}}{\text{Tensão no Primário}} \right)^2 \cdot (R_g + R_{prim})$$

Assim, neste exemplo, $R_{ST} = 4,17\Omega$.

Com estes dados podemos calcular:

$$\omega R_{carga} C = 377 \times 2 \times 10^{-4} \times 250 = 18,85$$

$$R_{ST}/R_{carga} = 0,017 = 1,7\%$$

$$V_{PICOsec} = 163 \times 1/6 = 27,17 \text{ V}$$

$$V_{PICO} = \text{tensão de pico no secundário após os diodos} = V_{PICOsec} - 2 \times 0,7 = 25,77\text{V}$$

Utilizando o gráfico 2 temos:

$$\frac{V_{DC}}{V_P} \cdot 100\% \cong 91\% \quad \Rightarrow \quad V_{DC} \cong 0,91 \times 25,77 \text{ V} \cong 23,45 \text{ V}$$

Utilizando o gráfico 5 e calculando os parâmetros correspondentes, pode-se obter a corrente de pico repetitiva:

$$n = 2 \text{ (monofásico de onda completa)}$$

$$n\omega R_{carga}C = 37,7$$

$$R_{ST}/nR_{carga} = 0,008 = 0,8\%$$

$$I_{carga} = \text{corrente média na carga} = 23,45\text{V}/250\Omega \cong 94 \text{ mA}$$

$$I_M = \text{corrente média nos diodos} = I_{carga}/2 = 94\text{mA}/2 = 47\text{mA}$$

e portanto, sendo:

$$I_p/I_M = 11 \quad \Rightarrow \quad I_p = 11 \times 47\text{mA} = 0,52^A$$

Utilizando o gráfico 4 pode-se determinar a corrente eficaz no diodo:

$$I_{ef}/I_M = 2,9 \quad \Rightarrow \quad I_{ef} = 2,9 \times 47\text{mA} \cong 136\text{mA}$$

O valor eficaz da componente alternada é determinado utilizando-se o gráfico 3:

$$V_{ef}/V_{DC} \times 100\% = 3,3\% \quad \Rightarrow \quad V_{ef} \cong 0,033 \times 23,45 = 0,77\text{V}$$

Se alterarmos o valor do capacitor para $C = 1000\mu\text{F}$, obtemos:

$$n\omega R_{carga}C = 377 \times 10^{-3} \times 250 = 94,25$$

Neste caso, utilizando o gráfico 2, temos:

$$\frac{V_{DC}}{V_P} \cdot 100\% \cong 92\% \quad \Rightarrow \quad V_{DC} \cong 0,92 \times 25,77 \text{ V} \cong 23,71 \text{ V}$$

e conseqüentemente: $I_{carga} \cong 95 \text{ mA}$ e $I_M \cong 47,5 \text{ mA}$

Do gráfico 5, temos:

$$I_p/I_M = 11 \quad \Rightarrow \quad I_p = 11 \times 47,5 \text{ mA} = 0,53 \text{ A}$$

Do gráfico 4, utilizando agora: $n\omega RC = 188,5$ e $R_{ST}/nR_{carga} = 0,8\%$, temos:

$$I_{ef}/I_M = 3,2 \quad \Rightarrow \quad I_{ef} = 3,2 \times 47,5\text{mA} \cong 150\text{mA}$$

Do gráfico 3:

$$V_{ef}/V_{DC} = 0,7\% \quad \Rightarrow \quad V_{ef} \cong 0,007 \times 23,71 = 166\text{mV}$$

Visto que a utilização de um capacitor de $1000\mu\text{F}$, ao invés de $200\mu\text{F}$, melhora em cinco vezes a tensão de ondulação sem exigir muito mais dos diodos, esta opção é mais interessante.

Como vemos, as curvas de Schade nos permitem dimensionar com bastante precisão os componentes que pretendemos utilizar, bem como analisar rapidamente o que ocorrerá no circuito quando modificarmos os componentes.

1.5 PROBLEMAS RELACIONADOS COM A REALIZAÇÃO PRÁTICA DE CIRCUITOS RETIFICADORES

A tensão obtida de transformadores de potência sempre sofre uma queda de ~5% quando em plena carga em relação à tensão em vazio devido às resistências internas desses transformadores.

Nunca se esqueça também que quando se trata de fontes de baixa tensão devemos considerar o efeito de v_d , devido ao fato que um diodo para retificação (diodo retificador) em condução apresenta uma queda de tensão da ordem de 0,8V ou superior se fabricado de silício e se polarizado na metade de sua corrente máxima.

Em especial, nos circuitos retificadores possuindo filtro com capacitor à entrada, as quedas nos diodos e nos enrolamentos do transformador podem ser mais elevadas nos instantes em que há condução de picos de corrente.

1.6 BIBLIOGRAFIA

1. L.Q. Orsini, **Eletrônica**, Cap. 7, 1982.
2. Malmstadt, Enkeand Toren Jr., **Electronics for Scientists**, pág. 47-96.
3. John D. Ryder, **Eng. Eletronics**, pág. 505 a 520.
4. Landee Davis Albrecht, **Eletronic Designers Handbook**, pág. 15-9 e 15-10.
5. O. H. Schade, **Proc. of the IRE**, vol. 31, p.356, 1943.
6. A.M.V. Cipelli e W.J. Sandrini, **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**, Ed. Érica, pág. 46 a 130, 13a. Ed., 1986.